

基于高光谱反射率的糜子冠层叶片 叶绿素含量估算

韩浩坤, 妙佳源, 张钰玉, 张大众, 宗国豪, 官香伟, 李 境, 冯佰利

(旱区作物逆境生物学国家重点实验室, 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 连续两年大田试验研究不同糜子品种叶绿素含量与冠层光谱反射率, 并基于不同植被指数建立糜子叶片叶绿素含量的估测模型。结果表明, 参试糜子品种叶绿素含量在整个生育期呈现“低-高-低”的抛物线变化趋势, 最大值出现在抽穗期到开花期之间; 不同品种各生育期内冠层光谱反射率趋势一致, 在近红外波段, 冠层光谱反射率与叶绿素含量呈稳定正相关, 灌浆初期光谱反射率达到最大值; 可见光波段, 拔节期、开花期和灌浆初期冠层光谱反射率与冠层叶绿素含量呈正相关, 成熟期呈负相关; 糜子冠层叶绿素含量与 760~900、630~690、550 nm 波段组合的植被指数具有较高相关性; 基于 RVI、PSNDb、GNDVI750 能较好地建立糜子叶绿素含量统一检测模型, 决定系数分别为 0.791、0.779、0.748; 模型验证的相对误差分别为 9.58%、8.93%、11.80%; 均方根误差分别为 0.045、0.140、0.196。表明利用 RVI、PSNDb、GNDVI750 建立的模型能较为准确地预测糜子冠层叶绿素含量。

关键词: 糜子; 叶绿素含量; 高光谱反射率; 植被指数

中图分类号: S516; S127 **文献标志码:** A

Estimating chlorophyll content of proso millet canopy by hyperspectral reflectance

HAN Hao-kun, MIAO Jia-yuan, ZHANG Yu-yu, ZHANG Da-zhong, ZONG Guo-hao,
GONG Xiang-wei, LI Jing, FENG Bai-li

(State Key Laboratory of Crop Stress Biology for Arid Areas / College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi)

Abstract: The objective of this study was to establish the reliable estimation model of chlorophyll content based on proso millet canopy hyperspectral reflectance, by two-year field trials of different varieties. The results showed that the chlorophyll content of proso millet presented a parabola pattern during the whole growth period, with the maximum value being at the heading stage to the flowering period. This trend is consistent across different growth stages of eight varieties. The proso millet canopy spectral reflectance of elongation stage, flowering period and early filling stage and chlorophyll content were positively correlated, it show negative correlation in maturation stage at the visible light band. A marked correlation relationship was revealed between the proso millet canopy chlorophyll content and vegetation index with combination of near infrared wavelengths (760~900 nm), the red light wavelengths (630~690 nm) and 550 nm green band, which is the most ideal forecast canopy chlorophyll content area. Monitoring models based on RVI, PSNDb and GNDVI750 produced better estimation for chlorophyll content, and the determination coefficients (R^2) were 0.791, 0.779 and 0.748. Meanwhile, comparing the predicted value with measured value to verify reliability and applicability of monitoring model, result showed that the relative errors (RE) between measured value and predicted value were 9.58%, 8.93%, 11.80%, and the root mean square errors were 0.045, 0.140, 0.196, respectively. Therefore, it was suggested the vegetation indices of RVI, PSNDb and GNDVI750 were the most suitable model for estimating proso millet chlorophyll content.

Keywords: proso millet; chlorophyll content; hyperspectral reflectance; vegetation index

收稿日期:2016-10-22

修回日期:2017-02-28

基金项目:国家自然科学基金项目(31371529);国家“十二五”科技支撑计划(2014BAD07B03);谷子糜子产业技术体系项目(CARS-07-13.5-A9)

作者简介:韩浩坤(1991—),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事小杂粮高效栽培研究。E-mail: hkh1114@163.com。

通信作者:冯佰利(1966—),教授,博士生导师,主要从事作物高产生态生理技术及小杂粮栽培、育种研究。E-mail:7012766@163.com。

叶绿素作为主要吸收光能的物质,直接影响光合作用效果,是反映植物生长状况和健康状况的重要参数^[1],也是作物对环境胁迫、氮素状况、发育阶段等的反应指示器^[2],被作为作物生长检测的重要指标。传统的叶绿素含量检测主要是通过化学分析的方法,效率低且破坏作物生长,因此需要寻找一种快速测量作物叶绿素含量的检测方法。

利用高光谱遥感技术估算植被叶绿素含量的研究已广泛开展。在可见光范围内,植被反射光谱主要受植被色素影响^[3],其中叶绿素含量与植被光谱特征具有密切联系,因此,可用植被冠层的反射光谱来估算叶绿素含量。冯伟^[4]等研究表明白粉病胁迫下冠层叶绿素含量与红光 600~630 nm 和红边 690~718 nm 的反射率显著相关;冀荣华^[5]等研究表明,苹果叶片叶绿素含量与反射光谱在 515~590 nm 和 688~715 nm 两波段内具有较高的相关性;刘豪杰^[6]等根据玉米拔节期 550、650、766 nm 和 850 nm 波长反射率,计算植被指数与叶绿素含量的关系,建立了多品种玉米拔节期叶绿素含量诊断模型;M. Schlemmer^[7]等研究表明在 780~800、540~560 nm 以及 730~750 nm 波段的反射率可以用于反映玉米叶片叶绿素含量;妙佳源^[8]等初步研究了旱区糜子冠层光谱的红边特性。杨峰^[9]等研究了水稻和小麦高光谱植被指数与叶绿素含量之间关系,表明二次修正土壤调节植被指数(MSAVI2)与水稻叶绿素含量相关性较好,建立了叶绿素含量模型;王强^[10]等通过线性及多元逐步回归技术构建棉花冠层叶绿素高光谱诊断模型,表明植被指数估算精度要优于单波段或多波段线性模型;谭海珍^[11]等利用 MSI200 型成像光谱仪和 ASD FieldSpec FR2500 型非成像地物光谱仪对冬小麦苗期叶绿素含量监测,将植被指数与叶绿素含量拟合建模,表明比值植被色素指数预测精度较高;Mark N^[12]等研究表明 R_{800}/R_{700} 和 R_{800}/R_{640} 的比值与苹果叶片叶绿素含量成正相关;刘桃菊^[13]等研究水稻冠层高光谱与叶绿素含量的相关性,表明比值植被指数和色素比值指数可作为监测水稻冠层叶片叶绿素含量的特征变量;艾金泉^[14]等系统分析了利用植被指数估算互花米草叶片光合色素含量,表明在各波长范围内二者的相关性变化趋势一致,其中红边区域是估算的最佳波段;石吉勇^[15]等采用联合区间偏最小二乘法优选光谱特征区间,最终建立黄瓜叶片叶绿素含量光谱模型。已有研究大多通过实测光谱数据来构建植被指数建立叶绿素含量估算模型,但有关糜子农田冠层结构特征、高产农田冠层叶片光合色素变化及其估测模型

尚未见相关报道。

本文针对不同类型的糜子品种,在各生育期采集冠层光谱反射率,计算多种植被指数,旨在建立糜子叶绿素含量估算模型,为遥感技术在糜子叶绿素含量监测上提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于陕西榆林小杂粮试验示范基地,109.78°N,38.39°E,海拔 1 100 m,干旱半干旱大陆性季风气候,年平均气温 10℃,平均降水 400 mm 左右,无霜期 150 d 左右。试验地为风沙土,耕层有机质 6.11 g·kg⁻¹,pH 值为 8.25,全氮 0.36 g·kg⁻¹,碱解氮 25.38 mg·kg⁻¹,速效磷 2.47 mg·kg⁻¹,速效钾 53.37 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验于 2014—2015 年实施,采取随机区组设计,3 次重复,小区面积 10 m²(2 m×5 m),基本苗 45 万株·hm⁻²,行距 33.3 cm。供试 8 个品种中粳性品种 3 个分别为品糜 1 号(M1)、陇糜 5 号(M2)、陇糜 8 号(M3),糯性品种 5 个分别为龙黍 21 号(M4)、宁糜 15 号(M5)、晋黍 5 号(M6)、晋黍 8 号(M7)和粘丰 5 号(M8)。2014 年 6 月 15 日播种,9 月 23 日收获;2015 年 6 月 12 日播种,9 月 20 日收获。其它栽培管理同高产农田^[16]。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 冠层光谱反射率测量 糜子冠层光谱反射率采用美国 ASD 公司的便携式野外光谱仪(FieldSpec 3)。波段为 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 采样间隔为 1.4 nm,1 000~2 500 nm 采样间隔为 2 nm,视场角 25°,距冠层顶垂直高度约 15~20 cm。测量选择在天气晴朗、无云、无风时进行,测定时间为 10:00—14:00。于糜子拔节期、抽穗期、开花期、灌浆初期、灌浆后期和成熟期测量。每小区测 5 个点,每个观测点记录 10 个光谱数据,取算数平均值作为该观测点光谱反射率。各小区测量前,进行标准白板校正(标准白板反射率为 1)。

1.3.2 叶绿素含量测量 测量光谱的同时,用日本生产的 SPAD-502 便携式叶绿素仪测定糜子叶片的叶绿素含量,其读数可以准确表征叶绿素相对含量。在测定冠层光谱反射率所选定的 5 个位点下每个位点随机选取 3 株,测其旗叶、倒二叶、倒三叶,测量时避开叶脉位置,测定叶片的上、中、下部位,最后取均值作为该叶片的叶绿素含量相对值,取所有位点的平均值作为表征该品种冠层叶片叶绿素含量相

对值。

1.4 植被指数及拟合模型的选择

总结前人研究冠层水平绿色植物叶片叶绿素含量估算的高光谱指数,选择归一化植被指数(normal difference vegetation index, NDVI)^[17],差值植被指数(differential vegetation index, DVI)^[18],比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)^[19],优化土壤调整植被指数(optimized soil adjusted vegetation index, OSAVI)^[20],比值植被色素指数(plant pigment ratio, PPR)^[21],转换叶绿素吸收反射指数(transform the chlorophyll absorption reflection index, TCARI)^[22],绿度归一化植被指数(green degree of normalized difference vegetation index, GNDVI)^[23],色素比值指数(pigment specific simple ratio, PSSR)^[24],色素归一化差值指数(pigment specific normalized difference, PSND)^[24],叶绿素指数(chlorophyll index, RCh)^[25],三角植被指数(triangular vegetation index, TVI)^[26],绿色叶绿素指数(green chlorophyll index, Clgreen)^[27],红边叶绿素指数(red edge chlorophyll index, Clred edge)^[27],归一化色素叶绿素指数(normalized pigment chlorophyll index, NPCI)^[28],结构不敏感色素指数(structure insensitive pigment index, SIPI)^[29],植被衰老反射率指数(plant senescence reflectance index, PSRI)^[30]等,以叶绿素含量为因变量,不同类型植被指数为自变量,建立叶绿素高光谱遥感监测模型。不同植被指数计算公式见表 1。

1.5 数据处理

依据不同年份、不同生育时期、不同品种将叶绿素和冠层光谱反射率数据进行汇总,按表 1 公式计算植被指数。使用便携式野外光谱仪(FieldSpec 3)测定设备自带的 ViewSpecPro 软件的 Splice Correction 功能对原始数据修正,剔除反射率数值不合理波段。以 2015 年数据为基础,对糜子冠层光谱参数与叶片叶绿素含量进行相关分析,通过回归分析建立糜子叶片叶绿素含量监测模型,利用拟合决定系数(R^2)和 F 值筛选方程。然后利用 2014 年数据对所建模型进行测试和检验,采用均方根差(root mean square error, RMSE)和相对误差(relative error, RE)作为精度评价标准。公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

$$RE\% = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \times 100\%$$

式中, \hat{y}_i 是估测值, y_i 是实测值, n 为样本数。

表 1 采用的高光谱植被指数
Table 1 Hyperspectral vegetation indices

植被指数 Vegetation indices	计算公式 Algorithm formula	来源文献 References
NDVI	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	[17]
DVI	$R_{\lambda 1} - R_{\lambda 2}$	[18]
RVI	$R_{\lambda 1} / R_{\lambda 2}$	[19]
OSAVI	$1.16 \times (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	[20]
PPR	$(R_{550} - R_{450}) / (R_{550} + R_{450})$	[21]
TCARI	$3 \times [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550}) / (R_{700} / R_{670})]$	[22]
GNDVI800	$(R_{800} - R_{550}) / (R_{NIR} + R_{GREEN})$	[23]
GNDVI750	$(R_{750} - R_{550}) / (R_{NIR} + R_{GREEN})$	[23]
GNDVI	$(R_{NIR} - R_{GREEN}) / (R_{NIR} + R_{GREEN})$	[23]
PSSRa	R_{800} / R_{680}	[24]
PSSRb	R_{800} / R_{635}	[24]
PSNDa	$(R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	[24]
PSNDb	$(R_{800} - R_{635}) / (R_{800} + R_{635})$	[24]
RCh	$(R_{640} - R_{673}) / R_{673}$	[25]
TVI	$0.5 \times [120 \times (R_{750} - R_{550}) - 200 \times (R_{670} - R_{550})]$	[26]
Clgreen	$(R_{NIR} / R_{GREEN}) - 1$	[27]
Clred edge	$(R_{NIR} / R_{Red Edge}) - 1$	[27]
NPCI	$(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	[28]
SIPI	$(R_{800} - R_{445}) / (R_{800} - R_{680})$	[29]
PSRI	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$	[30]

注: R 为原始光谱反射率, R_x 表示在波长 x nm 处的光谱反射率; R_{NIR} 为 760 ~ 900 nm 波段范围内光谱反射率平均值; R_{RED} 为 630 ~ 690 nm 波段范围内光谱反射率平均值; R_{GREEN} 为 540 ~ 560 nm 波段范围内光谱反射率平均值; $R_{Red Edge}$ 为 720 ~ 740 nm 波段范围内光谱反射率平均值。

Note: R , spectral reflectance; R_x , reflectance of x nm. R_{NIR} , average spectral reflectance of 760 ~ 900 nm; R_{RED} , average spectral reflectance of 630 ~ 690 nm; R_{GREEN} , average spectral reflectance of 540 ~ 560 nm; $R_{Red Edge}$, average spectral reflectance of 720 ~ 740 nm.

2 结果与分析

2.1 不同品种糜子冠层叶绿素含量

如图 1 所示,随着生育进程的推进,不同糜子品种叶片叶绿素含量呈先升高后降低的趋势,其中品种糜 1 号(M1)、陇糜 5 号(M2)、陇糜 8 号(M3)、龙黍 21 号(M4)和粘丰 5 号(M8)在抽穗期叶绿素含量达到最大值,宁糜 15 号(M5)、晋黍 5 号(M6)、晋黍 8 号(M7)在开花期达到最大值。不同品种之间差异显著($P < 0.05$)。

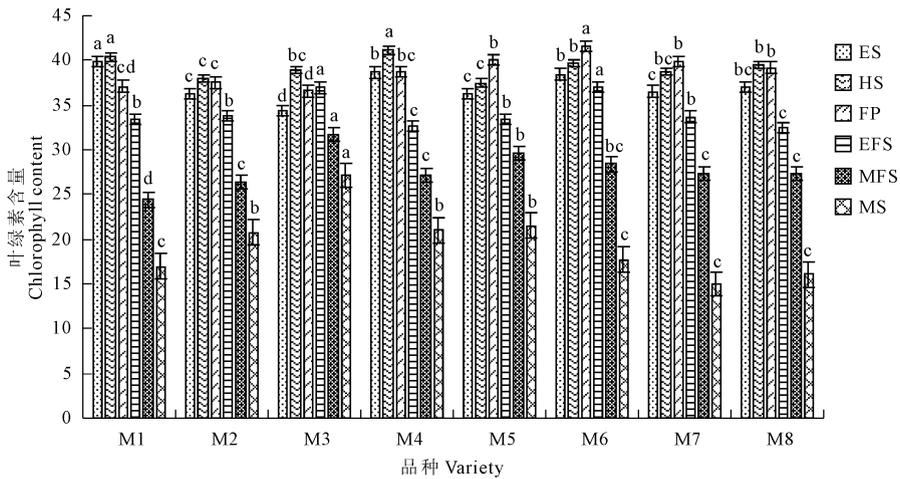


图 1 不同生育期糜子品种叶片叶绿素含量变化

Fig.1 Changes of chlorophyll content in the leaf in different growth stages of proso millet

注:ES、HS、FP、EFS、MFS、MS 分别代表拔节期、抽穗期、开花期、灌浆初期、灌浆中期、成熟期,下同。

Note: ES, HS, FP, EFS, MFS, and MS represent elongation stage, heading stage, flowering period, early filling stage, middle filling stage and maturation stage, respectively; the same below.

2.2 不同品种糜子冠层光谱反射率

不同品种糜子冠层光谱反射率存在差异,但是反射光谱曲线走势基本一致,在近红外光波段差异较明显。以 2015 年晋黍 5 号冠层光谱反射率为例,分析不同生育期冠层光谱反射率的变化(图 2)。为降低噪声影响,将全波段范围(350~2 500 nm)内 1 350、1 850 nm 和 2 450 nm 附近波段及其附近波段噪声数据剔除,以便分析。

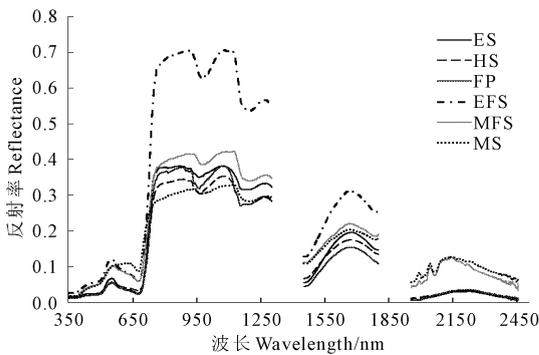


图 2 晋黍 5 号生育期内冠层光谱反射率变化

Fig.2 Canopy spectral reflectance in development stages of Jinshu No.5

由图 2 可知,各生育期在 550 nm 处有一反射峰,主要是绿光对光合色素的强烈反射造成的,不同时期差异较大;在波长 670 nm 附近产生了一个较明显的吸收谷,主要是叶绿素对红光的吸收作用产生的;在 710~760 nm 之间,光谱反射率急剧上升。在 970 nm 附近光谱反射率出现一个吸收谷,在 1 600 nm 附近有一反射峰。近红外光波段从抽穗期开始,

反射率逐渐升高,到灌浆初期反射率达到最高值。

分析不同品种灌浆初期冠层光谱反射率的变化(图 3)。在 550 nm 处有一反射峰,各品种差异较大,冠层光谱反射率最高为晋黍 5 号(M6),最低为粘丰 5 号(M8);在 710~760 nm 之间,光谱反射率急剧上升;在 800 nm 附近冠层光谱反射率为宁糜 15 号(M5)最高,粘丰 5 号(M8)最低。

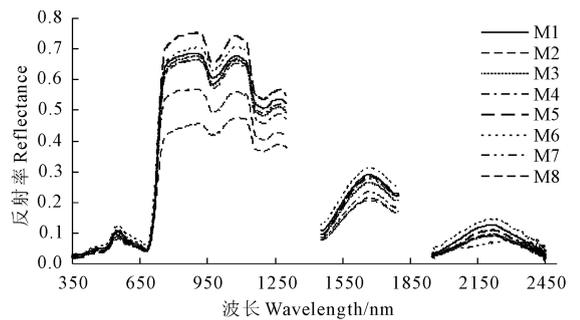


图 3 不同品种糜子灌浆初期冠层光谱反射率

Fig.3 Canopy spectral reflectance in early grain filling stage of different proso millet

2.3 叶绿素含量与冠层光谱反射率的相关性

通过糜子叶片叶绿素含量与高光谱植被指数之间的相关性分析(图 4)可知,在可见光波段,糜子拔节期、开花期和灌浆初期冠层光谱反射率与冠层叶绿素均表现为稳定的正相关,开花期和灌浆初期呈显著正相关($P < 0.01$),成熟期呈负相关。在近红外波段,不同生育期冠层光谱反射率与叶绿素相关性趋势一致,750~1 100 nm 之间有一个相对稳定的平台,呈正相关,其中抽穗期、开花期和灌浆初期呈

显著正相关($P < 0.01$)。

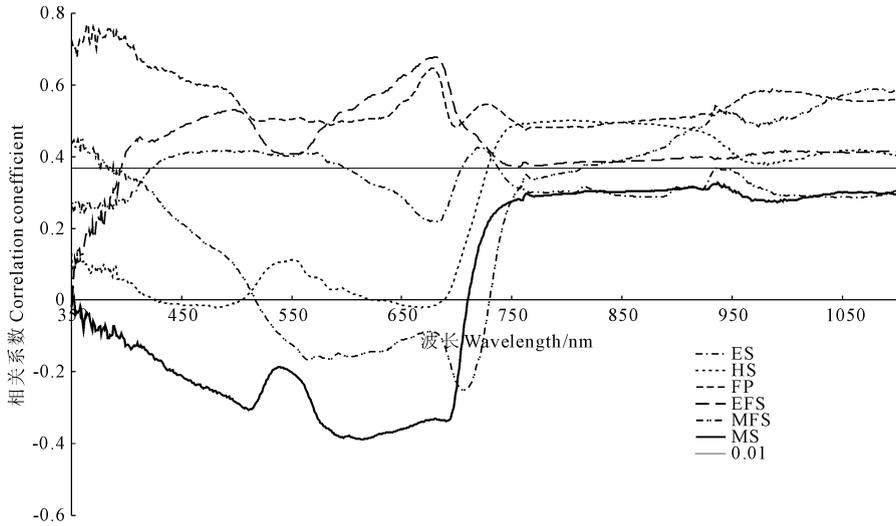


图 4 不同生育期糜子冠层光谱与冠层叶绿素含量的相关分析

Fig.4 Correlation between canopy reflectance spectrum and canopy chlorophyll content of proso millet

2.4 糜子叶绿素含量统一监测模型的拟合与验证

2.4.1 叶绿素含量与高光谱指数的相关性分析

通过计算不同类型植被指数,对不同生育时期冠层光谱反射率与叶绿素含量进行相关性分析(表 2)。

由表 2 可知,除 DVI、PPR、RCh 和 TVI 这 4 个植被指数外,其余 16 个植被指数与叶绿素含量均达到极显著相关($P < 0.01$),均可以作为构建叶绿素含量统一监测模型的参数。

表 2 植被指数与叶绿素含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between vegetation indices and chlorophyll content

	NDVI	DVI	RVI	OSAVI	PPR	TCARI	GNDVI ₈₀₀	GNDVI ₇₅₀	GNDVI	PSSRa
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.8623**	-0.0159	0.8200**	0.5607**	-0.0038	-0.7002**	0.8365**	0.8505**	0.8330**	0.8159
	PSSRb	PSNDa	PSNDb	RCh	TVI	CIgreen	CIred edge	NPCI	SIPI	PSRI
叶绿素含量 Chlorophyll content	0.8218**	0.8399**	0.8779**	-0.0719	-0.0533	0.7488**	0.7242**	-0.7280**	-0.7125**	-0.6491**

2.4.2 叶绿素含量统一监测模型的拟合与验证

选择 2015 年的糜子叶绿素含量与对应的植被指数,建立糜子叶片叶绿素含量统一监测模型,以 2014 年数据对模型进行验证(表 3)。由表 3 可知, R^2 范围为 0.379 ~ 0.795;模型预测值与田间实测值的 RE 范围为 8.93% ~ 56.87%,RMSE 范围为 0.045 ~ 0.889。从所选的模型中选择拟合(R^2)较高, RMSE 和 RE% 较小的拟合模型作为估测叶绿素含量的最佳模型,其中 RVI、GNDVI₈₀₀、GNDVI₇₅₀、GNDVI、PSSRb、PSNDa、PSNDb 和 CIgreen 8 个模型拟合程度较高。预测精度最高的 3 个模型是 RVI 与叶绿素含量拟合的一元三次方程, PSNDb 与叶绿素含量拟合的指数函数, GNDVI₇₅₀ 与叶绿素含量拟合的一元三次方程。 R^2 分别为 0.791、0.779、0.748; RE 分别为

9.58%、8.93%、11.80%; RMSE 分别为 0.045、0.140、0.196。

3 结论与讨论

本研究表明,不同糜子品种叶绿素含量在整个生育期内的变化趋势一致,但最大值出现时期不同,主要集中在抽穗期到开花期之间,整个生育期呈现“低-高-低”的抛物线变化趋势。参试品种冠层光谱反射曲线走势基本一致,在近红外光波段,灌浆初期的光谱反射率达到最大值。在 550、670、970 nm 以及 710 ~ 760 nm 和 760 ~ 1100 nm 光谱反射率差异较大,这与前人研究基本一致^[31-33]。将不同时期冠层光谱反射率与叶绿素含量进行相关分析,发现在 750 ~ 1100 nm 波段,冠层光谱反射率与叶绿素

含量呈正相关,刘桃菊^[13]等研究表明,此波段是绿色植物的各种变量与反射率关系最敏感波段^[34-35],所以可以利用近红外反射平台处光谱反

射率能更好反映叶绿素含量动态变化。这对区域内糜子群体长势实时监测具有重要意义。

表 3 糜子叶片叶绿素含量统一监测模型的拟合及验证

Table 3 Fitting and performance of chlorophyll content model of proso millet

植被指数 Vegetation indices	拟合模型 Fitting model			验证模型 Performance model	
	拟合方程 Equation	R^2	F 值 F value	相对误差/% Relative error	RMSE
NDVI	$y = 42.453 - 95.225x + 102.293x^2$	0.763	72.410	20.76	0.586
RVI	$y = 38.363 + 72.598x - 1492.951x^2 + 3673.002x^3$	0.791	55.462	9.58	0.045
OSAVI	$y = -60.723 + 179.491x - 90.021x^3$	0.379	13.726	47.81	0.741
TCARI	$y = 38.782 + 71.287x - 1347.365x^2 + 3364.072x^3$	0.497	14.500	39.42	0.679
GNDVI800	$y = -65.045 + 185.807x - 87.023x^3$	0.736	62.735	12.69	0.216
GNDVI750	$y = -48.388 + 157.105x - 73.151x^3$	0.748	66.951	11.80	0.196
GNDVI	$y = -74.996 + 204.599x - 97.164x^3$	0.734	62.173	13.78	0.228
PSSRa	$y = 13.702 + 2.056x - 0.014x^2 - 0.001x^3$	0.757	45.767	31.85	0.477
PSSRb	$y = 6.738 + 5.071x - 0.25x^2 + 0.004x^3$	0.795	56.760	19.25	0.302
PSNDa	$y = 67.464 - 162.254x + 144.551x^2$	0.748	66.619	13.89	0.214
PSNDb	$y = 7.717e^{1.853x}$	0.779	161.950	8.93	0.140
CIgreen	$y = -16.411 + 21.956x - 2.957x^2 + 0.133x^3$	0.750	43.939	20.47	0.303
CIred edge	$y = -17.746 + 187.667x - 222.902x^2 + 91.434x^3$	0.604	22.390	33.28	0.510
NPCI	$y = 37.181 + 19.007x - 332.665x^2 + 491.601x^3$	0.588	20.974	45.18	0.766
SIPI	$y = 61.020 - 32.07x + 9.038x^2 - 0.713x^3$	0.658	43.297	40.95	0.709
PSRI	$y = 35.377 - 174.618x - 3407.734x^2 + 33489.84x^3$	0.520	15.918	56.87	0.889

刘豪杰^[6]等研究发现,玉米 RVI 与叶绿素含量相关性达到极显著水平,可建立大田玉米叶绿素含量诊断模型;孙雪梅^[36]等研究水稻发现利用 550 nm 反射率构造的绿色归一化植被指数 GNDVI₇₅₀与叶绿素含量相关性最好。本研究表明,近红外波段(760~900 nm)与红光波段(630~690 nm)和 550 nm 左右的绿光波段组合的植被指数与糜子冠层叶绿素含量具有较高相关性,是预测冠层叶绿素含量最理想的区域。结合前人研究,基于敏感波段光谱,选择 20 种不同类型植被指数,分析其与叶绿素含量的相关性,发现其中 16 个植被指数达到极显著相关($P < 0.01$),这与前人研究基本一致^[37-38],但是 NDVI、OSAVI、TCARI、CIred edge、NPCI、SIPI 和 PSRI 建立的检测模型精度不高(RMSE > 0.500),PSSRa 和 CIgreen 建立的检测模型的相对误差较高(>20.0%),不适宜作为监测模型。筛选预测精度最高的 3 个模型参数分别是 RVI、PSNDb 和 GNDVI₇₅₀。决定系数分别为 0.791、0.779、0.748;实测值与预测值间的相对误差分别为 9.58%、8.93%、11.80%,均方根误差分别为 0.045、0.140、0.196。

高光谱数据丰富,根据不同的作物群体、不同的需求探索与不同的植被指数之间的关系,从而筛

选出合理有效的植被指数,建立检测模型。本试验主要以北方干旱半干旱区域内主栽糜子品种数据为基础,因此模型仍需在不同栽培措施、不同地域等条件下进行更为广泛的验证完善,进而促进高光谱遥感技术在糜子上的应用,为糜子产区长势监测提供重要技术支撑。

参 考 文 献:

- [1] 唐延林,王纪华,黄敬峰,等.水稻成熟过程中高光谱与叶绿素、类胡萝卜素的 变化规律研究[J].农业工程学报,2003,19(6):167-173.
- [2] Filella D, Pen-uelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. International Journal of Remote Sens, 1994, 15(7):1459-1470.
- [3] Gausman H W, Allen W A, Cardenas R. Relation of light reflectance to histological and Physical evaluations of cotton leaf maturity[J]. Application of Optics, 1970, 9:545-552.
- [4] 冯伟,王晓宇,宋晓,等.白粉病胁迫下小麦冠层叶绿素密度的高光谱估测[J].农业工程学报,2013,29(13):114-123.
- [5] 冀荣华,郑立华,邓小蕾,等.基于反射光谱的苹果叶片叶绿素和含水率预测模型[J].农业机械学报,2014,45(8):269-275.
- [6] 刘豪杰,赵毅,文瑶,等.基于多波段光谱探测仪的玉米冠层叶绿素含量诊断[J].农业机械学报,2015,46(增刊):228-233,245.

- [7] Schlemmer M, Gitelson A, Schepers J, et al. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 25(1):47-54.
- [8] 妙佳源,张钰玉,王孟,等.旱区糜子农田冠层光谱反射特征研究初报[J].*黑龙江八一农垦大学学报*,2015,27(5):6-9.
- [9] 杨峰,范亚民,李建龙,等.高光谱数据估测稻麦叶面积指数和叶绿素密度[J].*农业工程学报*,2010,26(2):237-243.
- [10] 王强,易秋香,包安明,等.基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算[J].*农业工程学报*,2012,28(15):125-132.
- [11] 谭海珍,李少昆,王克如,等.基于成像光谱仪的冬小麦苗期冠层叶绿素密度监测[J].*作物学报*,2008,34(10):1812-1817.
- [12] Mark N, Merzlyak, Alexei E, et al. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2003, 27(2):197-211.
- [13] 刘桃菊,胡雯君,张笑东,等.水稻冠层高光谱特征变量与叶绿素含量的相关性研究[J].*激光生物学报*,2015,24(5):428-435.
- [14] 艾金泉,陈文惠,陈丽娟,等.冠层水平互花米草叶片光合色素含量的高光谱遥感估算模型[J].*生态学报*,2015,35(4):1175-1186.
- [15] 石吉勇,邹小波,赵文杰,等.黄瓜叶片叶绿素含量近红外光谱无损监测[J].*农业机械学报*,2011,42(5):178-182,141.
- [16] 林汝法,柴岩,廖琴,等.中国小杂粮[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002:80-85.
- [17] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation of Natural Vegetation[C]//NASA/GSFC, Type III, Final Report. Greenbelt, MD, USA: Nasa, 1974: 1-371.
- [18] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1977, 43(12):1541-1552.
- [19] Pearson R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1972, 45(2):7-12.
- [20] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2):95-107.
- [21] Metternicht G. Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(14):2855-2877.
- [22] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn foliar chlorophyll content from leaf and canopy reflectance[J]. *Remote Sens Environ*, 2000, 74(2):229-239.
- [23] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS - MODIS[J]. *Remote Sensing Environment*, 1996, 58(3):289-298.
- [24] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of some hyperspectral approaches[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3):273-285.
- [25] Gupta R K, Vijayan D, Prasad T S. New hyperspectral vegetation characterization parameters[J]. *Advances in Space Research*, 2001, 28(1):201-206.
- [26] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76(2):156-172.
- [27] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3):271-282.
- [28] Penuelas J, Gamon J A, Fredeen A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2):135-146.
- [29] Peñuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoid/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance[J]. *Photosynthetica*, 1995, 31(2):221-230.
- [30] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening[J]. *Physiologia Plantarum*, 1999, 106(1):135-141.
- [31] 金震宇,田庆久,惠凤鸣,等.水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究[J].*遥感技术与应用*,2003,18(3):134-137.
- [32] 鞠昌华,田永超,朱艳,等.小麦叠加叶片的叶绿素含量光谱反演研究[J].*麦类作物学报*,2008,28(6):1068-1074.
- [33] 冯伟,朱艳,田永超,等.基于高光谱遥感的小麦冠层叶片色素密度监测[J].*生态学报*,2008,28(10):4902-4911.
- [34] 姚付启.冬小麦高光谱特征及其生理生态参数估算模型研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2012:45-50.
- [35] 冯伟,朱艳,姚霞,等.小麦叶片色素含量的高光谱监测[J].*应用生态学报*,2008,19(5):992-999.
- [36] 孙雪梅,周启发,何秋霞.利用高光谱参数预测水稻叶片叶绿素和籽粒蛋白质含量[J].*作物学报*,2005,31(7):844-850.
- [37] 贺佳,刘冰峰,李军.不同生育时期冬小麦 FPAR 高光谱遥感监测模型研究[J].*农业机械学报*,2015,46(2):261-269,275.
- [38] 唐延林.水稻高光谱特征及其生物理化参数模拟与估测模型研究[D].杭州:浙江大学,2004:90-106.